

論文 摩擦振子免震機構を有するコンクリート橋脚に生じる地震後の残留変位に関する実験的検討

金井 晴弘^{*1}・阿部 遼太^{*2}・秋山 充良^{*3}・小野 潔^{*4}

要旨: 著者らが過去に提案した摩擦振子型免震機構を有するコンクリート柱は、コンクリート橋脚の中間部に滑り曲面を設け、その位置より上にある部位を摩擦振子として滑らせることで、滑り曲面位置より下部に伝達される地震時慣性力を低減できる構造である。一方で、地震後の残留変位の大きさに影響する構造特性や地震動特性、さらには残留変位の数値解析的な評価は未検討であった。そこで、滑り曲面の形状や地震動の違いなどが残留変位の大きさに与える影響を震動台実験により確認した。実験的に得られた残留変位は、地震後の供用性を確保可能なほどに小さい値であったが、その定量評価は今後の課題として残された。

キーワード: 摩擦振子, 長周期構造, 残留変位, コンクリート橋脚, 震動台実験

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、耐震解析手法には長足の進歩が見られるのに対して、地震動評価には依然として圧倒的な不確実性が存在する。このような不確実性に対し、構造物の地震時安全性を確保するためには、地震動の不確実性の影響を受けないほど構造物の性能を高める必要がある。コンクリート系の耐震部材の開発では、この手段として部材靱性率を大きくしてきた。既に、降伏変位の約 20 倍までの応答変位が生じて、安定した曲げ挙動を呈する RC 柱も開発されている^{例え^ば 1)}。しかし、部材変形能により地震エネルギーの吸収を期待した構造は、基本的に地震後にある程度の修復作業を必要とする。橋梁は、地震後の救助・救急活動や、都市の復興に重要な役割を果たすことを考えると、地震中の安全性と地震後の供用性をともに確保できる技術開発が必要である。

この背景のもと、著者らは、摩擦振子型免震機構を有するコンクリート橋脚を提案し、その震動台実験により、基本的な地震時の応答特性を確認した^{2), 3)}。図-1 に摩擦振子型免震機構を有するコンクリート橋脚の模式図を示す。図-1 にある摩擦振子が滑り曲面上を運動することで、上部工に作用する慣性力の下部構造への伝達が遮断され、滑り曲面の形状および摩擦振子と滑り曲面間の摩擦で決定されるせん断力に起因する断面力が橋脚基部や基礎に作用する。これにより、地震動の大きさに関係なく、橋脚基部や基礎に作用する最大断面力を構造諸元のみで決定できるため、橋脚や基礎の弾性設計が可能となる。さらに、免震支承等の特別な装置を必要とせず、構造形態のみの工夫により長周期構造を実現するため、免震化に伴うコスト増を抑えることができる。参考

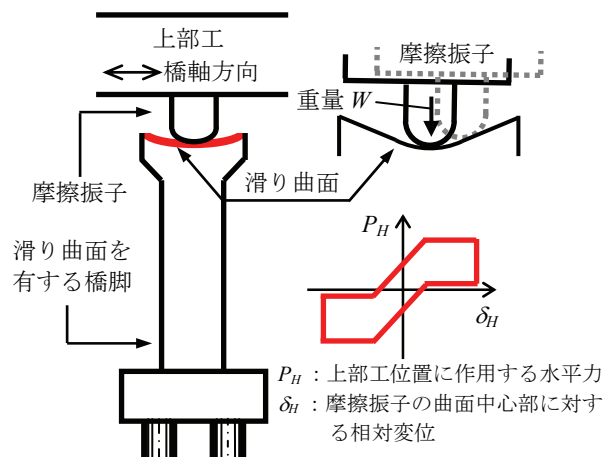


図-1 摩擦振子型免震機構を有する橋脚の模式図

文献^{2), 3)}で実施した震動台実験により、地震中の橋梁の安全性を確保する上で、摩擦振子型免震機構を有するコンクリート橋脚の有用性を確認できた。ただし、地震後の供用性を本構造が確保できていることを示すには、摩擦振子と滑り曲面間で生じる地震後の相対変位（残留変位）についての検証が必要である。

一般的な単柱式橋脚で生じる残留変位に関する既往の研究には、例えば、川島ら⁴⁾の残留変位比応答スペクトルに関する検討がある。残留変位は、1 自由度系に置換した橋脚の骨格曲線をバイリニアで表現したとき、その初期剛性と 2 次勾配の比に大きく依存し、さらに地震動毎に得られる残留変位のバラツキは非常に大きいことが示されている。一方で、橋脚に生じる残留変位の発生要因を橋脚の損傷のみに起因するものとして捉え、橋脚下端部と上部工の慣性力作用位置の相対変位で橋全体系の残留変位の大きさを表現すること、および震動台実験

*1 早稲田大学 創造理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*2 国土交通省 港湾局計画課 修士 (工学) (正会員)

*3 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博士 (工学) (正会員)

*4 大阪大学 大学院工学研究科地球総合工学専攻准教授 博士 (工学)

表-1 供試体諸元の一覧

供試体名	C-1	C-2	F-1	PF-1	PF-2	PE-1
滑り曲面の形状	円弧1	円弧1	平面	円弧1 直線	円弧1 直線	円弧1 円弧2
荷重-変位関係						
円弧1の半径	$R_1 = 80\text{mm}$	$R_1 = 130\text{mm}$	平面	$R_1 = 80\text{mm}$	$R_1 = 80\text{mm}$	$R_1 = 80\text{mm}$
円弧2の半径	—	—	—	$R_2 = \infty$	$R_2 = \infty$	$R_2 = 130\text{mm}$
D_v a)	—	—	—	23.0mm	15.3mm	23.0mm
固有周期(供)	2.0s	0.53s	∞	0.35s	2.0s	2.0s
固有周期(実)	0.35s	3.3s	∞	2.0s	0.35s	0.35s

a) 円弧1の中心位置から円弧1と直線の境界、あるいは円弧1と円弧2の境界までの水平距離

や被災橋脚から実測された残留傾斜角との比較から、RC 橋脚の残留変位の計算には相当に大きなモデル誤差が含まれることが指摘されている^{5),6),7)}。

本研究では、摩擦振子型免震機構を有するコンクリート橋脚の震動台実験を実施し、滑り曲面の形状、あるいは地震動特性などが残留変位やそのバラツキの大きさに与える影響を確認する。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験に使用した供試体の設置状況を写真-1 に示す。橋脚高さ 10m の橋梁を相似比 33 として作成した模型橋梁である。加速度の相似比を 1.0 として、他の諸元を決定している。上部工重量は 494kgf であり、摩擦振子に常時作用する軸力は 0.25MPa である。本実験で使用した供試体は、参考文献³⁾で使用した供試体と同じである。使用した供試体の一覧を表-1 に示す。供試体 C-1~C-2 は滑り曲面が一定の定曲面であり、摩擦振子を質点に置換した後の力の釣り合いにより、滑り発生後の摩擦振子の復元力および固有周期は次式で求められる。

$$Q = \mu W \quad (1)$$

$$K = W / R \quad (2)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (3)$$

ここに、 Q : 滑り発生荷重、 μ : 摩擦係数、 W : 摩擦振子に作用する軸力、 K : 滑り発生後の剛性、 T : 滑り発生後の固有周期、 R : 滑り曲面の半径、 g : 重力加速度である。

供試体 PF-1 と PF-2 は、滑り曲面が変動曲面となっている供試体である。変動曲面は曲面中心部が円弧であり、中心部から設定する曲面の変化点以降では直線となっている。摩擦振子が円弧部分より大きく変位して直線部に

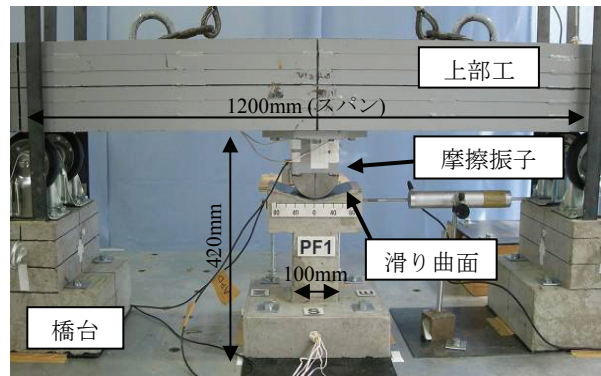


写真-1 供試体設置状況 (供試体 PF-1)

入ると、摩擦振子の水平移動に対する剛性はゼロとなり、摩擦振子を質点にモデル化すれば、その力の釣り合いより水平荷重 P_H - 水平変位 δ_H 関係の骨格曲線は、表-1 に示すようなトリリニア型となる。この特徴により、摩擦振子が変動曲面上を滑る場合には、定曲面で懸念される、大きな地震力作用時に発生する桁の水平移動に伴うアップリフトの抑制や、滑り曲面に作用するせん断力の増大による橋脚基部の損傷を防ぐことができる。一方で、定曲面の場合に比べ、大きな応答変位が生じた後の原点回帰が小さくなり、残留変位が大きくなる可能性がある。また、供試体 F-1 の滑り曲面は曲面を持たない平面である。

摩擦振子は鋼とコンクリートで作製した。滑り曲面を有する橋脚はコンクリート製である。滑り曲面の表面には鋼板が貼付してある。つまり、摩擦振子と滑り曲面は、それぞれ鋼と鋼、あるいはコンクリートと鋼で接触している。なお、後述するように、コンクリート製の摩擦振子を使用した場合、滑り曲面の鋼板と摩擦振子の接触によりコンクリート表面が摩耗し、凹凸ができる場合があった。その場合には、研磨具にてコンクリート表面を滑らかにし、次の载荷を行っている。本実験で使用した摩擦振子は鋼製とコンクリート製でそれぞれ一つである。摩擦係数は、参考文献³⁾で報告したように F-1 供試

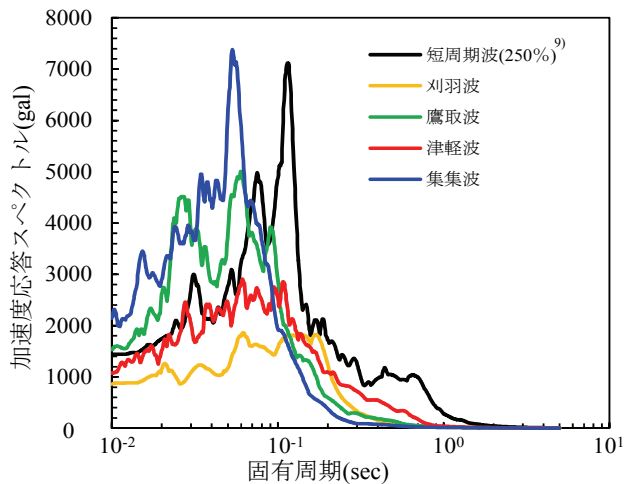


図-2 加速度応答スペクトル

体の実験結果から同定され、鋼と鋼で接触する場合は0.262、コンクリートと鋼で接触する場合は0.294である。摩擦係数の速度依存性を指摘する研究⁸⁾も報告されているが、以降の検討では、摩擦振子の速度によらずにこの摩擦係数を用いている。

2.2 震動台実験に使用する地震動

参考文献 2)と 3)では、2003年十勝沖地震の幕別町で観測された地震波（以下、短周期波⁹⁾の振幅の大きさを50%~250%の範囲で大小させて震動台実験に使用した。本研究では、地震動特性の違いが残留変位に与える影響を検討するため、短周期波250%を入力したときに摩擦振子に生じる最大滑り変位に近い応答を与える4つの地震波を用意した。具体的には、2007年中越沖地震の際に刈羽村役場で観測されたNS成分(刈羽波)、1995年兵庫県南部地震の際にJR鷹取駅構内で観測されたNS成分(鷹取波)、1983年日本海中部地震の際に津軽大橋周辺で観測されたEW成分(津軽波)、および1999年台湾で発生した集集地震で観測された地震波(集集波)を集め、そして、これらの地震波を相似則に基づき修正し、入力した際に得られる摩擦振子(C-1 供試体で摩擦振子は鋼製)の最大滑り変位が短周期波250%の入力結果から得られた最大滑り変位と概ね一致するように振幅の大きさを調整した。各入力地震波の加速度応答スペクトルの比較を図-2に示す。

なお、地震波は橋軸方向の一方向に入力している。橋軸方向と橋軸直角方向への二方向同時入力を受ける場合、あるいは三方向同時入力を受ける場合に生じる摩擦振子と滑り曲面間の残留変位の検討は、今後の課題である。

3. 摩擦振子免震機構を有するコンクリート橋脚に生じる地震後の残留変位

3.1 概説

摩擦振子型免震機構を有するコンクリート橋脚の震動台実験により、摩擦振子と滑り曲面間に生じる残留変

位の大きさを実験的に検討する。また、摩擦振子を1質点に置換し、表-1に示す骨格曲線を与えることで摩擦振子の滑り曲面上の運動を表現した。そして、この1質点系の運動方程式を解くことで、残留変位の大きさを解析的に算定する。なお、除荷・(再)載荷の剛性は摩擦振子が摩擦によって静止していることを表現するために十分に剛な値を与えている。数値積分法はNewmarkの β 法である。解析モデルの詳細は参考文献3)に示されている。

3.2 残留変位と地震動特性

供試体C-1について、各入力地震波に対して最大の滑り変位が発生する時刻を含む範囲で作成した摩擦振子の滑り変位の時刻歴波形を図-3と図-4に示す。図-3と図-4は、それぞれ摩擦振子が鋼製とコンクリート製の場合の結果である。摩擦振子が鋼製の場合には、鋼と鋼の組合せで接触することになり、このときには解析的に得られる滑り変位の時刻歴波形は良い精度で実験結果を再現できている。一方、摩擦振子がコンクリート製の場合には、津軽波に対する応答に示されるように、実験結果との差が大きくなる。コンクリートで摩擦振子を作製したときには、摩擦振子の表面が滑り曲面との接触により地震応答中に摩耗する場合があったこと、さらに、その摩耗の程度は、加振毎に異なることを実験で確認した。このようなコンクリート表面の状態の変化が実験結果と解析結果の差を生んでいると思われる。摩擦振子をコンクリート製としたときにコンクリート表面の状態、言い換えればコンクリートと鋼の摩擦係数を加振中に一定に保つための工夫が今後必要である。

図-3や図-4に示されるように、摩擦振子の材質によらず、供試体C-1で生じた最大の滑り変位は10~15mm程度である。一方で、実験的に得られる残留変位は地震動毎に異なり、地震時の摩擦振子の挙動を良く再現できる摩擦振子が鋼製の条件であっても、図-3の津軽波や短周期波250%を入力した結果に示されるように、実験結果と解析結果で残留変位には大きな差異が生じている。図-5と図-6には、全ての供試体について、地震波毎の残留変位の実験値と計算値の比 γ (= (実験値) / (計算値))を求めた結果を示す。図-5と図-6は、それぞれ摩擦振子が鋼製とコンクリート製の場合の結果である。実験値と計算値で正負の符号が異なることがあるため、 γ は正負の値を取る。なお、摩擦振子が鋼製のC-1供試体に対して鷹取波を入力した場合に γ が12を超えた。そこで、供試体や地震動毎の γ の差異を理解し易くするため、図-5の作成時にはこれを除いて図化した。

図-5に示されるように、滑り曲面の形状や地震動によらず、摩擦振子型免震機構を持つコンクリート橋脚に生じる残留変位を時刻歴応答解析で評価した結果には、非常に大きなバラツキが含まれることが分かる。実験で

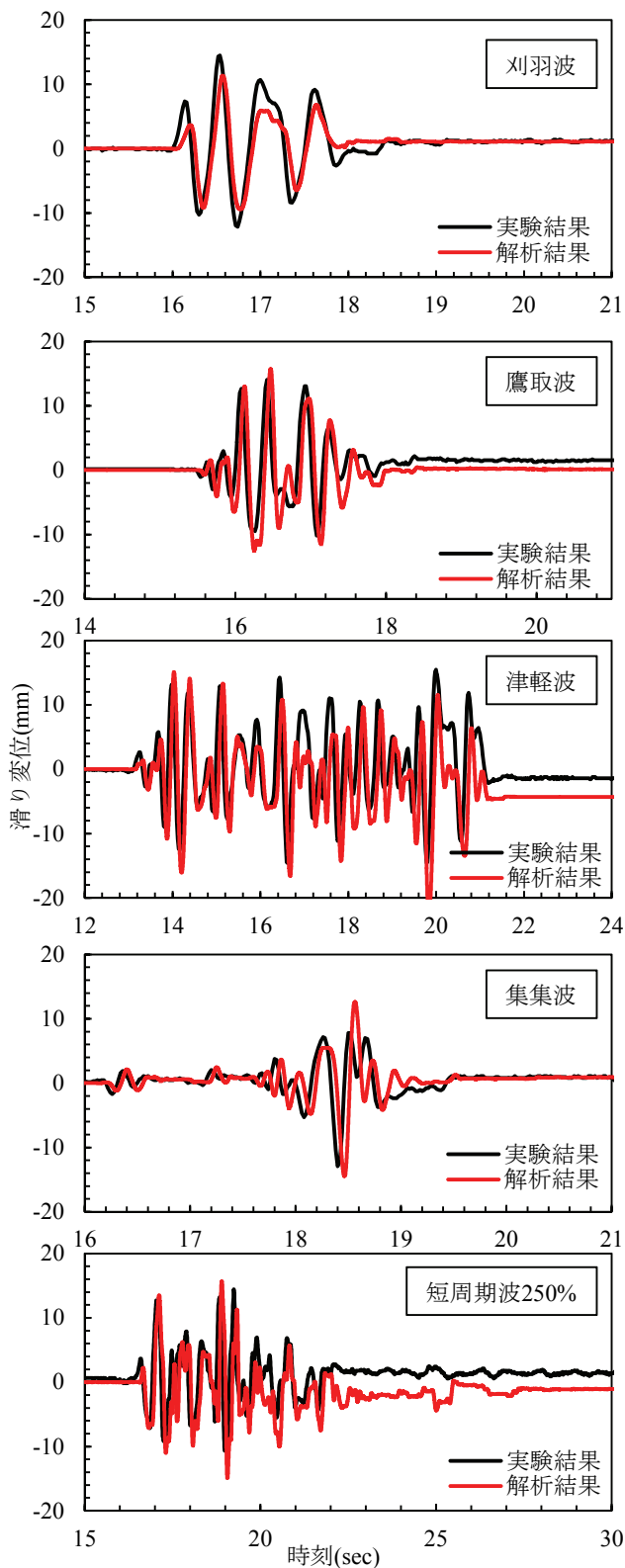


図-3 摩擦振子の滑り変位の時刻歴波形
(C-1 供試体, 摩擦振子:鋼製)

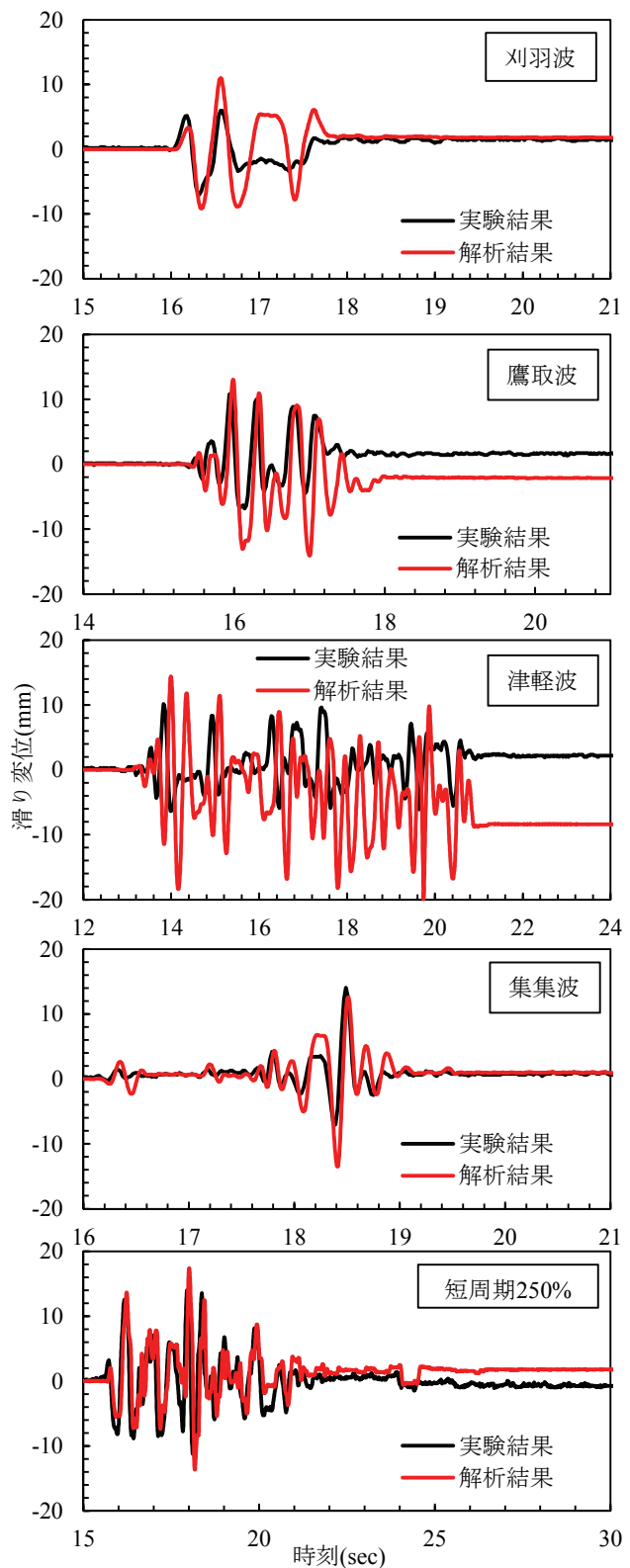


図-4 摩擦振子の滑り変位の時刻歴波形
(C-1 供試体, 摩擦振子:コンクリート製)

も、大きな滑りが生じた後の摩擦振子は、滑り曲面の存在により原点に回帰する動きを見せるが、その運動は滑らかなものではなく、地震動の振幅が小さくなる過程で停止と滑りを繰り返しながら収束し、残留変位が生じている。この動きを再現するには、摩擦振子を質点に置換

し、加振中の摩擦係数を一定に仮定するような簡易な応答解析からの改善が必要であり、今後の課題である。

3.3 地震後の供用性と可能最大残留変位

図-7 に残留変位の実験値を示す。図-7 は摩擦振子を鋼製とした場合の実験結果である。短周期波に関して

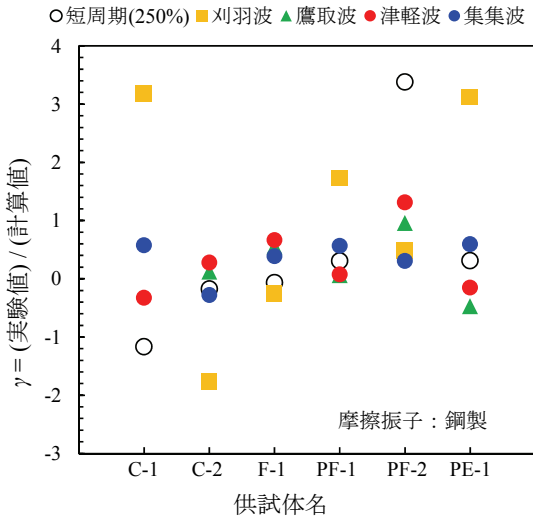


図-5 各供試体の実験値と解析値の比

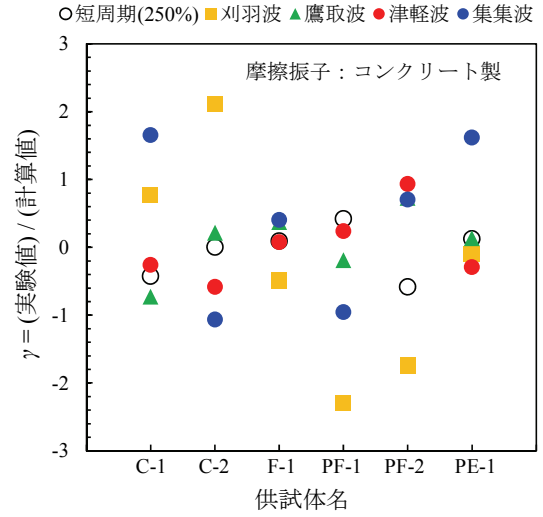


図-6 各供試体の実験値と解析値の比

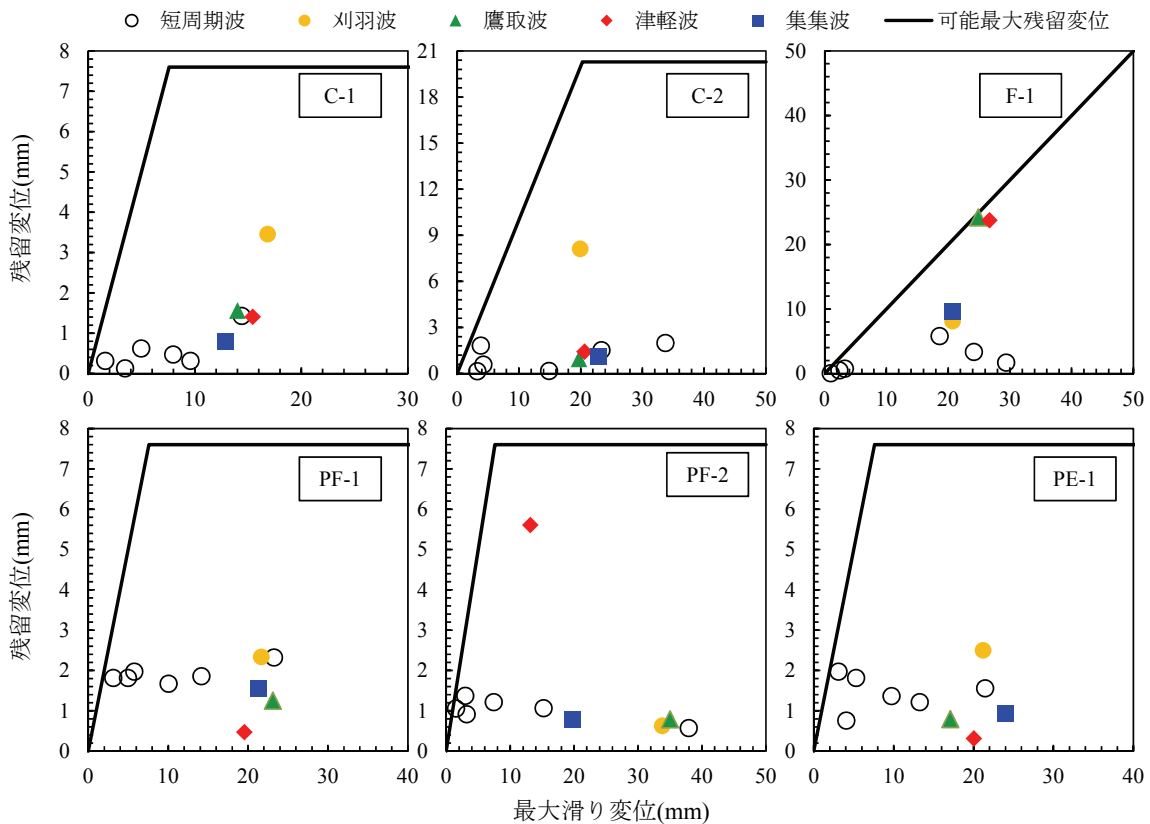


図-7 最大滑り変位-残留変位関係 (摩擦振子:鋼製)

は、振幅の大きさを 50%~250%まで小さくしたときの結果を示している。図中、最も大きな最大滑り変位を与えているのが振幅 250%のときの結果である。なお、摩擦振子がコンクリート製の場合でも、鋼製の場合と同様の傾向にあるが、摩擦係数の違いから摩擦振子がコンクリート製の場合の方が残留変位の実験値は大きい傾向にあった。図-7 の残留変位の実験結果に示されるように、摩擦振子を鋼製とした場合には、滑り曲面が変動曲面となる PF-1, PF-2, あるいは PE-1 で残留変位は何れも 2.5mm 以下である。参考文献³⁾では、滑り曲面より下部に位置する橋脚基部や基礎に作用する地震時慣性力を低

減し、さらに桁の水平移動に伴うアップリフトを抑えるためには、PF-1 や PF-2 の使用が望ましいことを報告した。また、阿部ら¹⁰⁾は、車種ごとに車両の通行が可能となる桁遊間を検討しており、それを参考に地震後の供用性を車両の通行可能性と置き換えると、摩擦振子と滑り曲面間に許容される残留変位の大きさは 80mm~150mm 程度である。今後、他の地震動や摩擦振子にさらに大きな滑り変位が生じた場合、あるいは地震後の橋梁の供用性の照査に用いる閾値についての検討が必要であるが、本実験の範囲では、PF-1 や PF-2 で生じた残留変位は相似則から推定される実橋レベルにおいて最大で

も 85mm 以下であり、この許容残留変位をほぼ満足できるものである。

前節で示したように、この残留変位を時刻歴応答解析により定量評価することは困難であったため、本節では、川島ら⁴⁾の残留変位比応答スペクトルの考えを参考に、各供試体の荷重-変位関係の骨格曲線から求められる可能最大残留変位を求め、それと実験結果との比較を行う。可能最大残留変位は、摩擦力と復元力の釣り合いである式(1)を満たす点である。

$$W \sin \theta = \mu W \cos \theta \quad (4)$$

ここで、 W ：支持荷重、 θ ：滑り曲面の法線方向の垂直からの角度、 μ ：摩擦係数である。ここに、 $\tan \theta$ は、滑り曲面の形状より

$$\theta = \frac{\delta_{Rmax}}{\sqrt{R^2 - \delta_{Rmax}^2}} \quad (5)$$

と表されるから、式(4)は

$$\delta_{Rmax} = \frac{\mu R}{\sqrt{1 + \mu^2}} \quad (6)$$

と変形できる。

この可能最大残留変位と実験結果の比較を図-7に示す。最大滑り変位が可能最大残留変位よりも小さい場合、発生しうる最大の残留変位は最大滑り変位と等しくなるため、可能最大残留変位は2直線で表現される。なお、平らな滑り曲面を持つF-1供試体では、発生しうる最大の残留変位は常に最大変位と等しい。図-7に示されるように、式(6)で求められる可能最大残留変位は実験値よりも相当に大きくなっており、この値をそのまま設計値として滑り曲面の形状などを定めることは不合理である。可能最大残留変位に低減係数 Cr を掛けた値(= $Cr \cdot \delta_{Rmax}$)を残留変位の設計値とし、 Cr を様々な地震動を用いた震動台実験により得られる残留変位の実験値との比較から定めていくような検討が今後必要である。

4. まとめ

本稿では、摩擦振子型免震機構を有するコンクリート柱に生じる残留変位について検討した。実験的に得られる残留変位は、地震動毎のバラツキが非常に大きいことを確認した。しかし、今回の検討に用いた短周期波250%は、現行の耐震設計で規定されるレベル2地震動よりも大きく、それによる最大滑り変位が生じた後にも、本構造に生じる残留変位は小さい値に抑えられることを確認できた。今後の継続した実験的検討が必要なものの、本構造は、地震中の安全性と地震後の供用性を兼ね備えたダメージフリー橋梁の一つになり得るものである。

一方で、実験的に得られる残留変位の大きさを解析により定量評価することは困難であった。また、可能最大残留変位の算定式から求められる値をそのまま設計値

とすることは不合理な設計結果をもたらす。残留変位を解析的に得るためのモデルの高精度化、あるいは他の多くの地震動を用いた実験結果に基づいて可能最大残留変位を低減できる係数などを見出す必要がある。

謝辞

本実験の一部は、日本鉄鋼連盟 鋼構造研究・教育助成事業(一般テーマ研究)により実施したものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 石橋忠良, 小原和宏, 菅野貴浩, 小林薫, 木野淳一: 矩形帯鉄筋を軸方向鉄筋の内側に配置した鉄筋コンクリート柱の正負水平交番載荷実験, 土木学会論文集, 732/V-59, pp.27-38, 2003.5
- 2) 秋山充良, 青木直, 阿部遼太, 黒田千砂子: 構造形態の工夫によるコンクリート構造の長周期化に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.859-864, 2011.7
- 3) 金井晴弘, 阿部遼太, 青木直, 秋山充良: 変動曲面上を滑る摩擦振子を有するコンクリート橋脚の地震応答特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.817-822, 2012.7
- 4) 川島一彦, Gregory A.MACRAE, 星隈順一, 長屋和宏: 残留変位応答スペクトルの提案とその適用, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.183-192, 1994.10
- 5) 阿部哲子, 藤野陽三, 阿部雅人: 1995年兵庫県南部地震による阪神高速高架橋の被害と2,3の分析, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.181-199, 1999.1
- 6) 土木学会: 阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証-検討課題と将来像-, コンクリート技術シリーズ 36, 2000.
- 7) 秋山充良, 土井充, 松中亮治, 鈴木基行: 構造系の信頼性を考慮したRC橋脚の耐震設計に用いる安全係数の試算, 土木学会論文集, Vol.718/V-57, pp.1-17, 2002.11
- 8) 金治英貞, 鈴木直人, 家村浩和, 高橋良和, 美濃智広, 高田佳彦: 低摩擦型すべり支承の面圧・速度依存性検証と床組免震構造の設計モデル構築, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp.758-771, 2006.10
- 9) 気象庁ホームページ: 気象統計情報・強震観測結果・地震波形, <http://www.jma.go.jp/jma/>
- 10) 阿部雅人, 藤野陽三, 吉田純司, 朱平: 高架橋の3次元動的解析モデルを用いた桁間連結装置および車両通行性の評価, 土木学会論文集, No.773/I-69, pp.47-61, 2004.1